

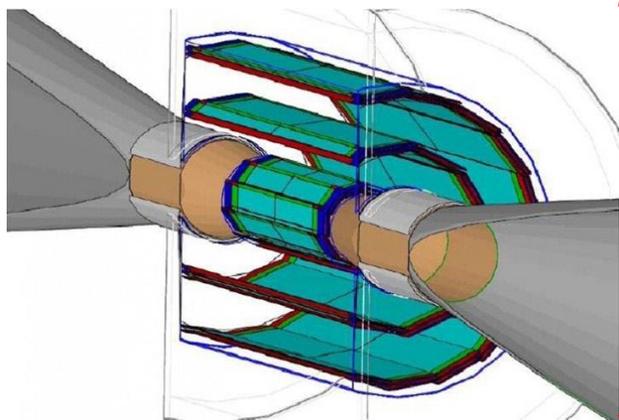
ILCにおける崩壊点検出器 FPCCDの放射線耐性の研究

2015/7/20

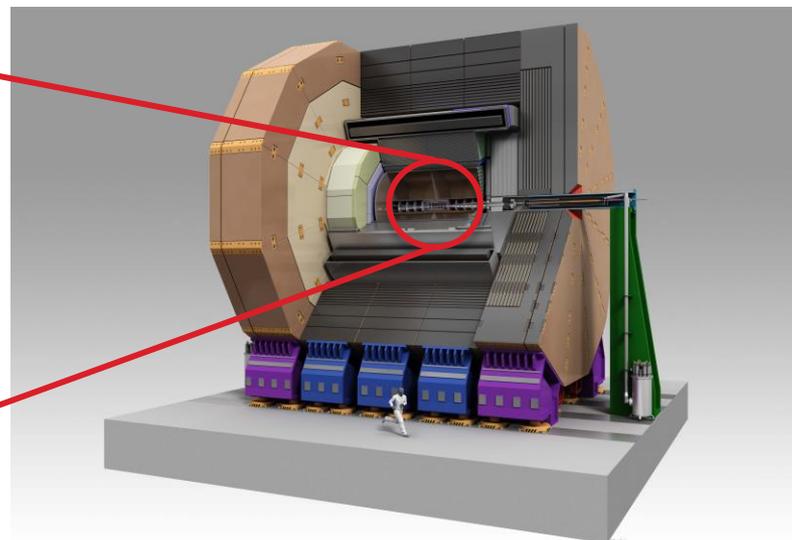
東北大学 素粒子実験研究室
修士1年 村井峻亮

ILCにおける崩壊点検出器

- ▶ ILCの崩壊点検出器の主な目的はb,cクォークの識別
 - b-jetが3つ、c-jetが2つ崩壊点を持っている。崩壊点を観測し、その数をb,cの識別に利用する
 - b,cの寿命が ~ 1 psと非常に短いため、数 μ mの精度の衝突径数分解能が必要とされる



崩壊点検出器



ILDイメージ図

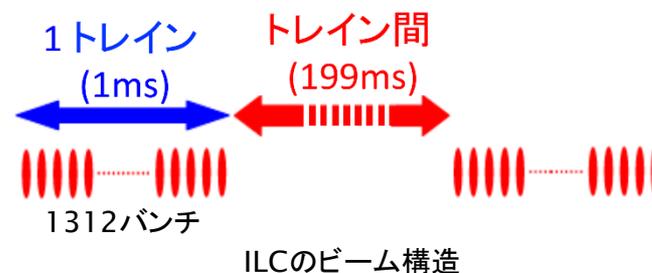
ILCにおける崩壊点検出器

▶ 主な要求性能

- 位置分解能 $3\mu\text{m}$ 以下
- 多重クーロン散乱を抑えるために低物質質量
- 最内層の半径が 1.6cm
- ピクセル占有率数%以下
→ $25\mu\text{m}\times 25\mu\text{m}$ ピクセルで1トレインの信号をためるとピクセル占有率10%以上になってしまい、正確な飛跡再構成ができない

▶ ピクセル占有率の解決方法

- ① 1トレインの間に何度も信号を読み出すことにより占有率を下げる
→ ビーム中に読み出すためビーム由来の高周波ノイズが乗ってしまう
- ② ピクセルサイズを小さくすることにより占有率を下げる

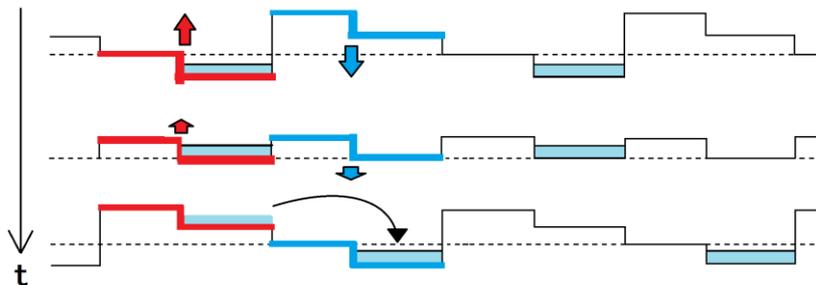


FPCCD

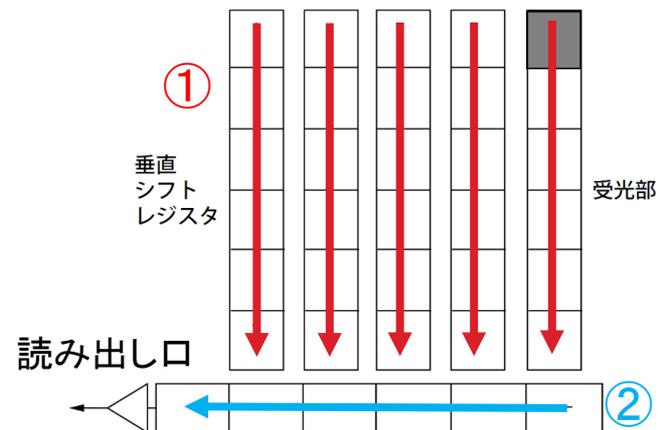
ピクセルサイズ $5\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$ で
占有率~1パーセントを達成!

FPCCDとは

- ▶ FPCCDとはFine Pixel CCDの略でピクセルサイズが非常に小さなCCDのこと
- ▶ そもそもCCDとは？
 - 一般的にビデオカメラ、デジタルカメラなどに使用されているイメージセンサー
 - 半導体のピクセル検出器
 - CCDはcharge coupled device(電荷結合素子)の略で、本質的には電荷転送装置
 - 1つの読み出し口に対してピクセルが複数つながっていて、電荷をピクセル内をバケツリレーのように転送させることにより信号を読み出す



電荷転送時のポテンシャル図



水平シフトレジスタ

CCDの概要図

FPCCDの特徴

- ▶ ピクセルサイズ: $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ → 高い位置分解能、衝突径数分解能
 - ▶ 総ピクセル数: 約 4×10^9 ピクセル → ピクセル占有率の低下
 - ▶ 全空乏型 → 高い2粒子分解能
 - ▶ トレイン間で読み出し → ビーム由来のノイズの影響を受けない

 - ▶ 1チャンネル 13000×128 pixelで最も遠いpixelは約13000回転送される
 - ▶ 放射線ダメージを受けやすい
 - 放射線によりCCDの半導体に格子欠陥が発生し、信号電荷がトラップされる
 - 最大で約10000回転送されるため、格子欠陥によるトラップ頻度が多い
- 実際に中性子をCCDにあて、転送効率がどの程度変化するか調べる

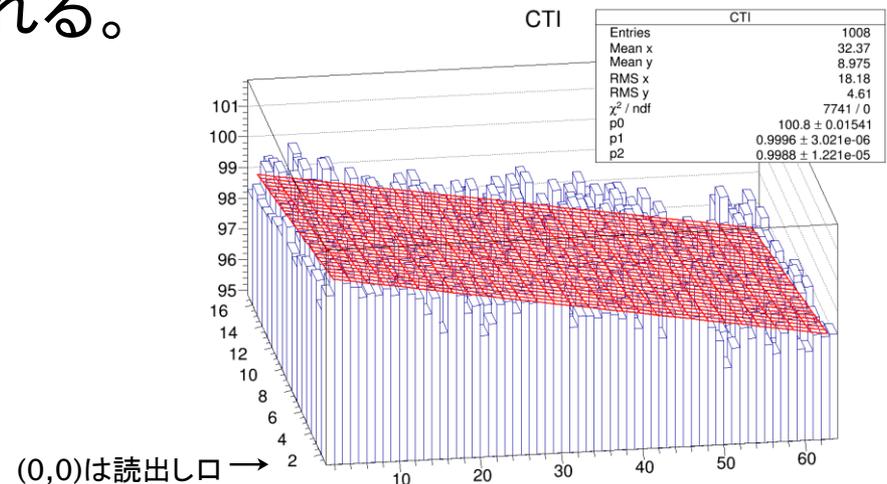
CTI (Charge Transfer Inefficiency)

- ▶ CTIとは、1ピクセル間の電荷転送非効率
- ▶ 転送前の信号電荷量をSとすると1ピクセル転送後の信号電荷量は $S \times (1 - CTI)$ で表される
- ▶ CCDのピクセル座標(x,y)に発生した電荷量をSとすると実際に読み出される信号電荷量は

$$f(x, y) = S(1 - CTI_h)^x (1 - CTI_v)^y$$

の関数で表されると考えられる。

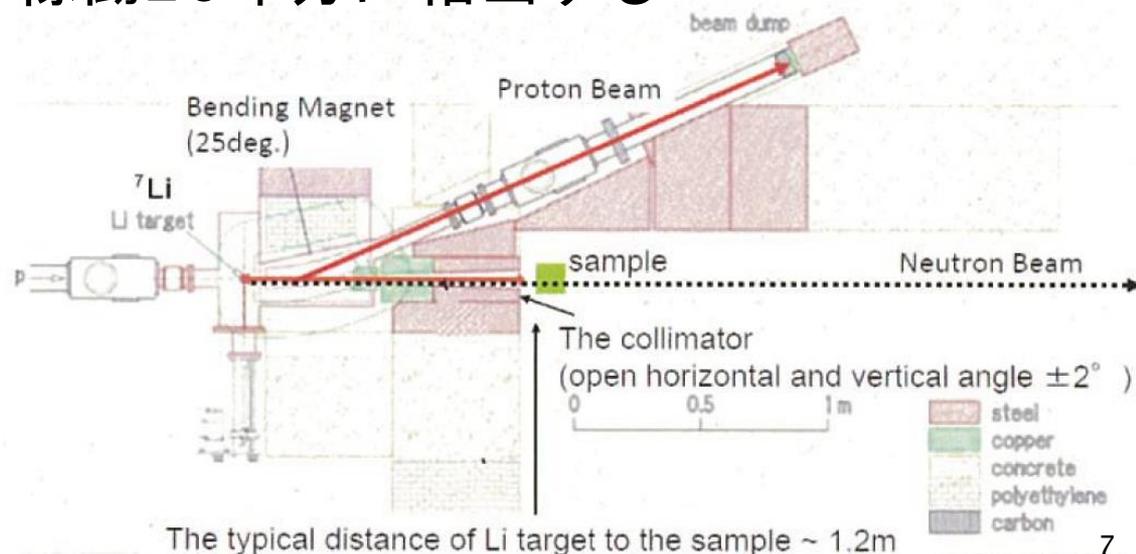
CTI_h : 水平方向のCTI
 CTI_v : 垂直方向のCTI



上の関数でCCDの電荷量をfitした図。
読出し口から遠い右上の信号は小さくなっている。

中性子照射試験@CYRIC

- ▶ 2014年10月15-17日にCYRIC でFPCCDの中性子照射試験を行った。
- ▶ 中性子ビームは70MeV陽子ビームを使い $\text{Li} + \text{p} \rightarrow \text{Be} + \text{n}$ 反応によって作られ、約65MeVとなる。
- ▶ 2時間照射しFluenceは $2.3 \times 10^{10} n_{eq}/\text{cm}^2$
- ▶ ILCでの中性子Fluenceは年間 $1.85 \times 10^9 n_{eq}/\text{cm}^2/\text{year}$ で、今回の照射はILCの稼働26年分に相当する



FPCCD試作素子

- ▶ 全部で4チャンネルあり、各チャンネルごとに水平転送ピクセルの大きさが異なる
- ▶ 1チャンネルは水平転送不良があり使用しない
- ▶ 今回は2～4チャンネルのCTI測定を行った

試作CCD

ch1

V : 6um × 6um 1024 × 255

H : 6um × 6um 1024 × 1

ch2

V : 6um × 6um 1024 × 254

H : 6um × 12um 1024 × 1

ch3

V : 6um × 6um 1024 × 253

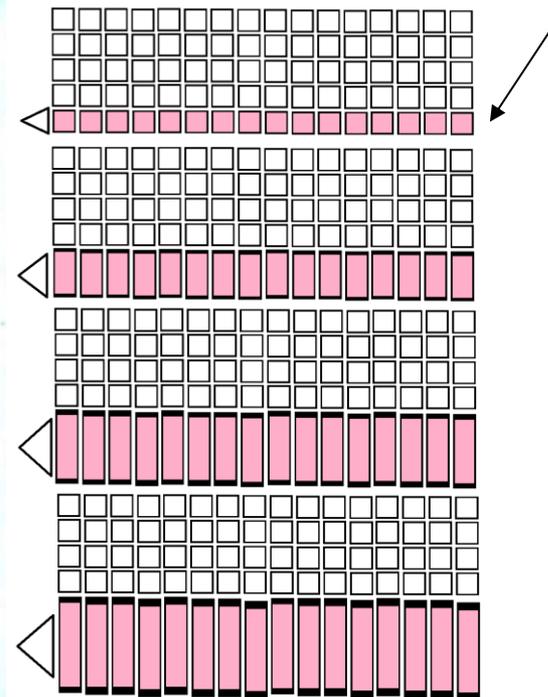
H : 6um × 18um 1024 × 1

ch4

V : 6um × 6um 1024 × 252

H : 6um × 24um 1024 × 1

水平転送ピクセル

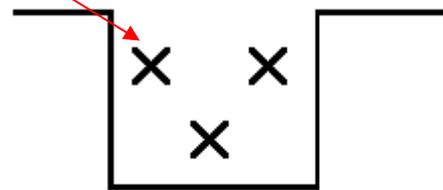
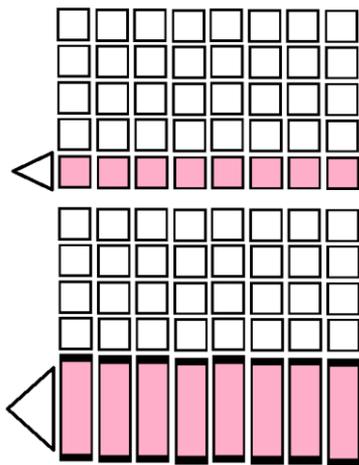


FPCCD試作素子

水平転送ピクセルのサイズが異なる理由

- 転送損失の主な原因はシリコンの格子欠陥によるトラップ
- 電荷がシリコンとあまり触れなければトラップされる回数も減るはず
- 水平転送ピクセルの大きさを変えることでその効果を見る

格子欠陥



水平転送ピクセルが小さい
→トラップされる回数が少ない



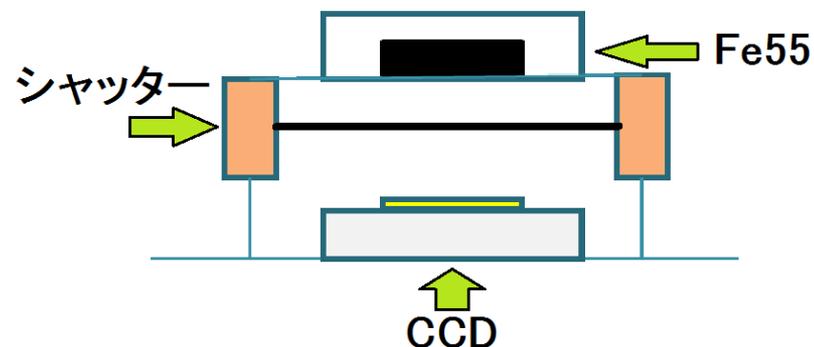
水平転送ピクセルが大きい
→トラップされる回数が多い

⊗ 転送方向

水平転送ピクセルが小さいほどCTIは小さいはず！

CTIの測定

- ▶ Fe55が出すX線はFPCCD内で約1600電子を落とす
 - 実際に荷電粒子が入射する状況を再現
- ▶ シャッターを開閉しX線照射した場合としてない場合を測定
 - シャッターを閉じたときは、ピクセル毎に個性のある暗電流を測定する
- ▶ 5秒照射、1秒読み出しを1イベントとし、照射時は15000イベント、非照射時は10イベント測定した
- ▶ FPCCDを -40°C に保ち暗電流を抑制
- ▶ 今回は電荷転送の速度を決めるパルス電流を6MHzで測定した
- ▶ 線源とCCDは十分に近く、X線は一様に照射されている



CTI 計算方法

▶ シングルヒットイベントの選定

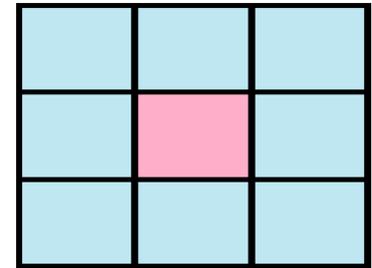
- シングルヒットイベントとはX線が1つのピクセルのみを通過したイベントのこと
- シングルヒットイベントで生成された一つのピクセルの電荷量は等しいと考えるとCTIを計算しやすい
- 以下の条件を満たしたものをシングルヒットイベントとする

中心ピクセルの信号のADC値 >70
周り8ピクセルの信号のADC値 $<5\sigma$

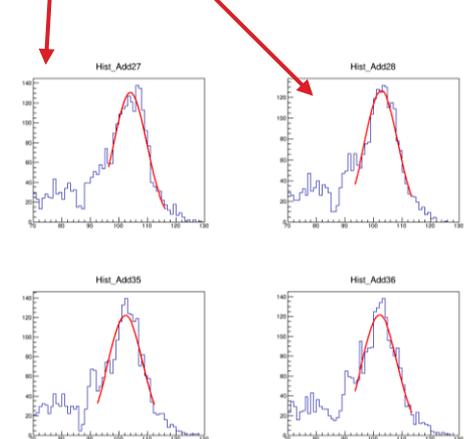
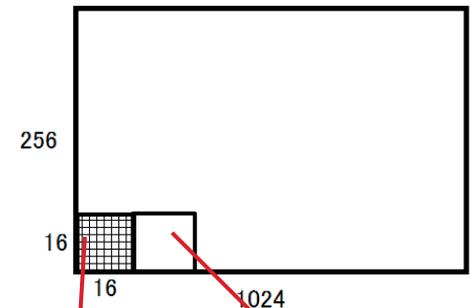
※シングルヒットイベントのピークのADC値は100-105程度でFWHMは15くらい

▶ シングルヒットピーク位置

- 1つのピクセルごとにシングルヒットイベントのADC値を考えるには統計量が足りないため、 16×16 pixelを1領域としてまとめて考える
- それぞれの領域のシングルヒットイベントのヒストグラムを作り、ガウシアンでfitする。ガウシアンのピーク位置を、その領域のシングルヒットイベントのADC値とする



シングルヒットイベント



シングルヒットイベントのヒストグラム
横軸はADC値でシングルヒットの電荷量に対応

CTI 計算方法

- ▶ 先ほど作った、それぞれの領域毎のシングルヒットイベントピーク位置のグラフを作る

{ X軸、Y軸: 領域の位置
Z軸: シングルヒットイベントのADC値、電荷量に相当

- ▶ このグラフを次の関数でfitする

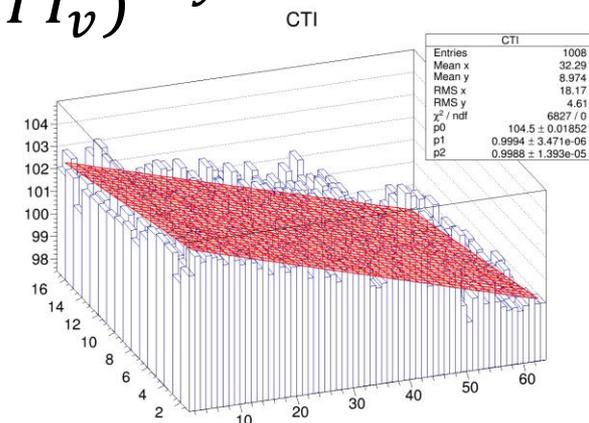
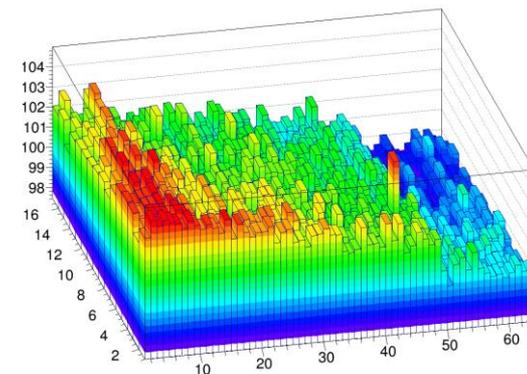
$$f(x, y) = S(1 - CTI_h)^{16x} (1 - CTI_v)^{16y}$$



フィット結果よりCTIを決定！



CTI_colz



結果

Channel	Frequency	Horizontal CTI (CTI_x)	Vertical CTI (CTI_y)	Horizontal register size
Ch2	6MHz	$(3.42 \pm 0.03) \times 10^{-5}$	$(6.35 \pm 0.10) \times 10^{-5}$	$6\mu m \times 12\mu m$
Ch3	6MHz	$(4.54 \pm 0.02) \times 10^{-5}$	$(6.06 \pm 0.10) \times 10^{-5}$	$6\mu m \times 18\mu m$
Ch4	6MHz	$(3.86 \pm 0.03) \times 10^{-5}$	$(6.12 \pm 0.11) \times 10^{-5}$	$6\mu m \times 24\mu m$

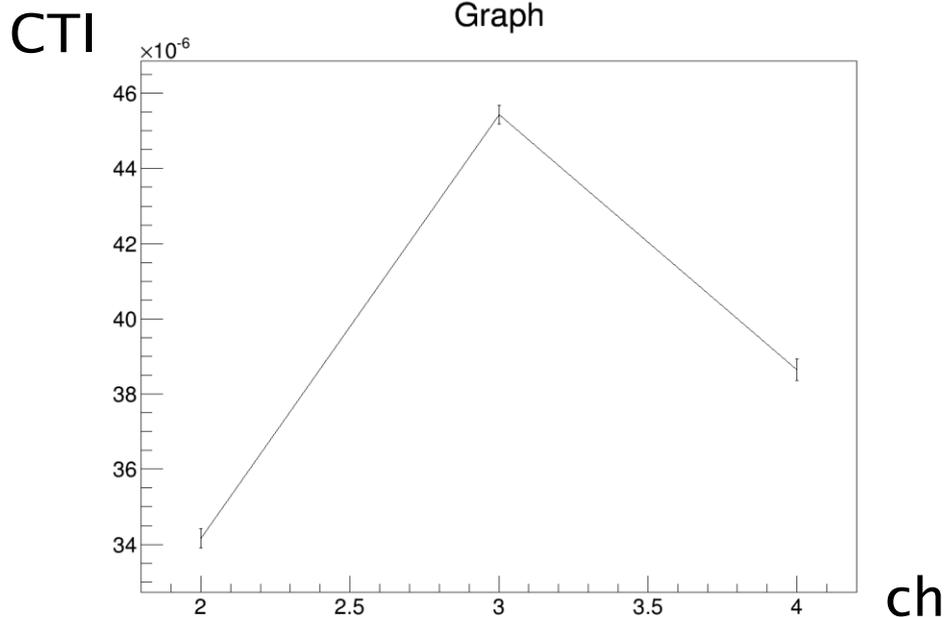
最大の転送回数は13000×128回転送される

$$(1 - 3.42 \times 10^{-5})^{13000} \times (1 - 6.35 \times 10^{-5})^{128} = 0.64$$

信号は6割程度残ることがわかった。しかし、ペアバックグラウンドによってさらにCTIの悪化が想定されているので、CTIを改善する必要がある。

→サイズが異なる水平転送ピクセルのCTIを比べることでCTIが改善されるか調べる

水平転送ピクセルサイズとCTIの関係



Channel	水平転送ピクセルサイズ
Ch2	6 μ m × 12 μ m
Ch3	6 μ m × 18 μ m
ch4	6 μ m × 24 μ m

6MHzのときのチャンネルと Horizontal CTIとの関係

ピクセルサイズが小さいほどCTIが小さくなると予想していたが、そうはならなかった・・・
→今後、他の周波数でも測定してみる

まとめ

- ▶ ILCの崩壊点検出器にはFPCCDが有力な候補となっている
- ▶ 中性子放射試験を行い、FPCCDの放射線耐性を測定した。中性子のみでは問題ない結果となったが、他の要因でCTIの悪化が予想されるので改善が必要。
- ▶ 水平転送ピクセルのサイズの違いによりCTIが改善しようとしている
 - CCDに周波数依存の特性があるため、ほかの周波数でもCTIを調べてみる